第40卷 第7期
2023年7月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 7
Jul. 2023

蒸散分离的玉米水分利用效率变化及影响因素

庄淏然[1]， 冯克鹏[1,2,3]， 许德浩[1]

（1. 宁夏大学土木与水利工程学院，宁夏 银川 750021；2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心，宁夏 银川 750021；3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心，宁夏 银川 750021）

摘 要： 水分利用效率（WUE）是农田生态系统碳水循环的重要指标，对指导农业灌溉和提高水分生产力有重要意义。宁夏灌区是我国地处干旱气候带的大型灌区，其中，玉米种植面积最大。在涡度通量观测农田生态系统实际蒸散发（ET）的基础上，利用氢氧稳定同位素法将蒸散发分割为土壤蒸发（evaporation，E）、植物蒸腾（transpiration，T），并通过光能利用模型估算宁夏引黄灌区典型玉米农田生态系统的总初级生产力（GPP），计算群体水分利用效率 WUE_T=GPP/T、生态系统水分利用效率 WUE_{ET}=GPP/ET 以及固有水分利用效率（Intrinsic Water Use Efficiency）$IWUE_{VPD}$=（GPP·VPD）/ET三种水分利用效率，进而从函数响应关系、相关性以及敏感性三个方面分析不同水分利用效率与气温、饱和水汽压差（VPD）、CO_2浓度、光合有效辐射以及土壤含水量等环境因子之间的关系。结果表明：宁夏引黄灌区玉米农田生态系统生长季的实际蒸散发变化呈单驼峰型，作物蒸腾与实际蒸散发的变化趋势相一致。WUE_T在生育期内呈"W型"变化，WUE_{ET}与$IWUE_{VPD}$在生育期内呈"单峰型"变化，三种WUE的峰值出现在抽雄期，分别达到5.90 kg C·m^{-3}·H_2O、5.02 kg C·m^{-3}·H_2O和32.90 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O，灌浆后期三种水分利用效率开始降低，玉米成熟晚期由于蒸腾微弱所以WUE_T略有增加。WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$与土壤含水量显著正相关，相关度和敏感性最强；VPD与三种WUE显著负相关，相关度和敏感性最强次之；气温、光合有效辐射以及CO_2浓度与三种WUE的负相关性但不是敏感因素。因此，在宁夏引黄灌区土壤水分和VPD是影响玉米农田生态系统WUE的关键因素。

关键词： 氢氧稳定同位素；蒸散分离；光能利用模型；总初级生产力；作物蒸腾

水分利用效率是植物进行光合作用每消耗单位质量的水所固定的碳量，是农田生态系统碳水循环的关键指标[1]。水分利用效率存在多种定义，不同的定义有着不同的见解。通常根据研究尺度的不同，将其分为群体层面水分利用效率（不计土壤蒸发）和生态系统水平水分利用效率（将土壤蒸发和植物蒸腾之和作为总耗水量）[2]。群体层面水分利用效率表征了植物群体光合固定的碳量和植物蒸腾量之比[3]。生态系统水分利用效率则反映了整个生态系统消耗单位质量水分所固定的CO_2或生产的干物质量[4]。早期研究生态系统水分利用效率的方法大多集中于个体水平和群体层面，常用的测定方法主要有物质交换法、固定碳同位素法等。在生态系统水平上，水分利用效率的测定方法主要依靠田间测定法[5]。传统点尺度观测并不能满足生态系统碳水循环的大尺度研究。随着微气象学的发展，涡度相关技术逐渐成为蒸散发观测的先进手段，并促使生态系统水平上水分利用效率研究取得突破性进展[6]。Beer等[7]学者的研究表明，饱和水汽压差对生态系统日尺度和小时尺度的碳水循环有很大影响，在之后的研究中便引入了固有水分利用效率，它是总初级生产力与饱和水汽压差乘积与蒸散发的比值。

农田生态系统的实际蒸散发（evapotranspiration，ET）由土壤蒸发（E）和作物蒸腾（T）共同组成。ET是研究水分利用效率和生态系统水量平衡的重要参数[8]。目前蒸散发的观测和区分已有大量的实验研究，涡度相关法是测定蒸散的常用且最有效的

收稿日期： 2023-03-08； **修订日期：** 2023-05-17
基金项目： 国家重点研发计划项目（2021YFD1900600）；宁夏自然科学基金重点项目（2021AAC02007，2022AAC02007）；宁夏高等学校科研项目（NGY2020006）；宁夏高等学校一流学科建设项目（NXYLXK2021A03）
作者简介： 庄淏然（2000-），男，硕士研究生，主要从事蒸散发及水分利用效率研究. E-mail: 756771967@qq.com
通讯作者： 冯克鹏. E-mail: fengkp@nxu.edu.cn

方法。上述水分利用效率的定义中分别用到了T和ET，因此需要对ET进行分离。传统方法分别用茎流计和蒸渗仪估算植被蒸腾量以及土壤蒸发，从而实现蒸散分离。也有结合涡度相关系统观测的蒸散发，用模型估算蒸散组分实现分离。但上述方法存有局限性，如使用茎流计、蒸渗仪法的空间代表性不足，点尺度观测并不能代表该区域的总体水平；而模型模拟蒸散分离涉及参数的修订和验证，不确定因素多，导致分离的精准性存在欠缺[9]。近年来，氢氧稳定同位素技术已成为有效研究陆地生态系统水分耗散结构的科学方法，相比于传统的研究方法，氢氧稳定同位素的高度精准性和可控性使其在蒸散分离、水分溯源以及水循环等领域得到了认可和广泛使用[10]。已有大量研究表明：光合有效辐射、饱和水汽压差、土壤含水量等环境因子是农田生态系统水分利用效率的影响因素[11-12]，且各个影响因素对水分利用效率的影响是非线性的。因此，除了相关性分析之外[13]，还应从全局的角度，注重因素之间相互耦合作用对水分利用效率的影响。

宁夏青铜峡引黄灌区是我国干旱半干旱地区的大型灌区，也是国家商品粮基地之一。灌区内玉米种植面积居首。研究玉米农田生态系统的水分利用效率，对当地提高水资源利用效率和提高产量有重要的意义。本文采用氢氧稳定同位素法对涡度相关系统观测的实际蒸散发进行分离，进而从群体水平、生态系统水平和固有水分利用效率，研究宁夏引黄灌区玉米农田生态系统水分利用效率变化，并对环境影响因素及其全局敏感性进行分析，为灌区合理配置农业水资源灌溉、提高水分生产力提供科学依据和参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况和实验观测

研究区位于宁夏青铜峡市引黄灌区（图1），海拔1081 m，为典型的干旱半干旱区，属温带大陆性气候。常年干旱少雨，年均降雨量仅189.9 mm。年日照时数3044.1 h，日照百分率在50%以上。年内的平均温度为9.2 ℃。年平均无霜期为178 d。当地种植的农作物以水稻、小麦和玉米为主，且耕作层的土壤主要为壤土和沙壤土两个类型。试验区的地下水埋藏深度1.5 m以上，在进行农业灌溉或降雨后，地下水深度会上升。实验材料为当地玉米作物，播种前对农地进行施肥处理，玉米以行距0.6 m、株距0.4 m的距离种植，灌溉方式为畦灌。

依托宁夏大学在该灌区建设的长期农田生态系统观测站及试验场开展工作。核心试验场中心设有涡度相关观测塔一座，塔高10 m，安装美国Campbell公司CPEC310涡度观测设备及其他气象水文观测设备（图1），开展全天候观测。观测站核心仪器包括测定CO_2和水汽通量的CO_2/H_2O红外气体分析仪，测定风向、超声虚温、水平和垂直风速脉动的三维超声风速仪。辅助观测系统包括雨量桶、四分量净辐射仪、空气温湿度传感器、风速风向仪，

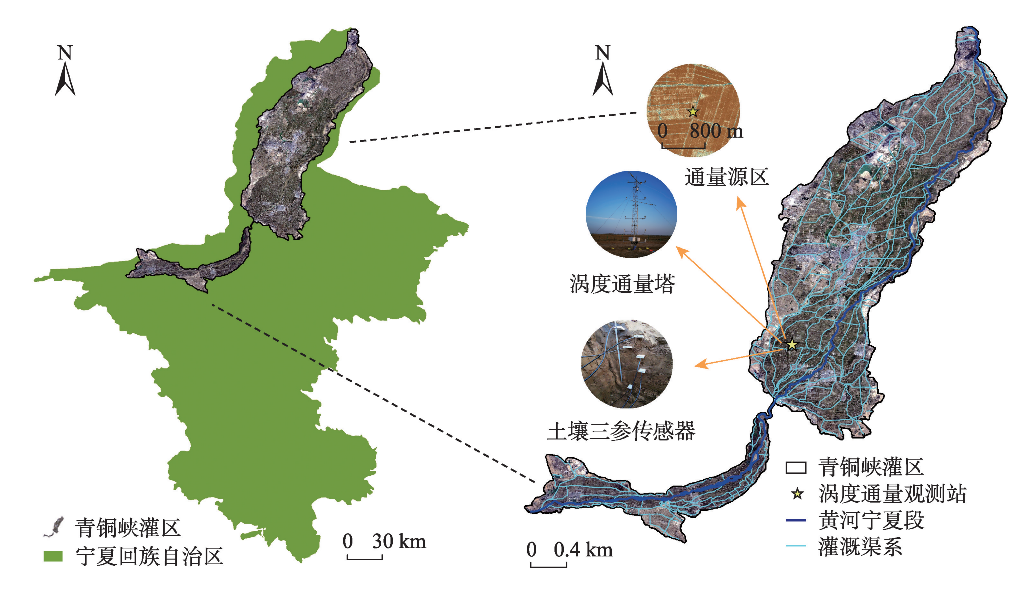


图1 研究区域与核心观测设备

Fig. 1 The location of the in-situ research and the core observation equipment

分别用来同步观测降雨量、辐射数据(R_n)、光合有效辐射(PAR)、空气温度(Ta)、空气相对湿度(RH)、饱和水汽压差(VPD)以及风速、风向等气象数据。本研究在通量塔的1 m、2 m、4 m、7 m、10 m处分别放置抽气管,用于采集大气水汽。在农田0~100 cm的土壤层放置土壤水分、温度、电导率三参数传感器(TEROS12,Meter)观测的土壤含水量(SWC)。

1.2 样本数据采集与测定

以研究区通量塔为圆心,半径为800 m的圆形区域。并以半径每隔100 m,方向每隔22.5°划分区位,以方便更精准的进行采样(图2a)。实验取样对象有三类:土壤水、玉米植株水及大气水。取样周期为玉米的各个生育期内采集一次,根据采集当天的风向和通量贡献度,在划分好的区域等距离选择五个取样点,灌水后进行加测;最后将采集的样本经过真空抽提后,进行氢氧稳定同位素分析。三类样本具体采样方式如下(图2b~图2e):

(1)土壤水样本采集,用土钻钻取100 cm深,将0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm各个土壤层的土样分别装入做好标记的样品瓶,用封口膜密封后放入冷藏箱保存。再通过室内全自动真空冷凝抽提系统(LI-2000,LICA,China)抽提出液态水。

(2)玉米植株水样本采集,在所采土样的附近选取一株玉米,取下根和茎分别装入做好标记的样品瓶,现场用封口膜密封后放入冷藏箱保存。回室内后使用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2000,LICA,China)抽提出液态水。

(3)大气水样本取样,采用便携式多通道大气水汽冷阱(AWVCT04,LICA,China)仪器与通量塔不同高度(1 m、2 m、4 m、7 m、10 m)的抽气管对接,收集>2 mL的凝结水后,用封口膜密封放入冷藏箱保存。大气水样本的采集时间与土壤水、植物水保持同步。

(4)氢氧同位素测定,以上土壤、玉米植株以及大气水样,使用液态水同位素分析仪GLA431-TL-WIA(912-0050)进行氢氧稳定同位素测定。该设备$\delta^{18}O$和$\delta^{2}H$的测定精度达到了0.02‰和0.15‰。测试以VSMOW为标准样,并依据是否发生醇类污染对结果数据进行校正。

(5)农田生态系统的降雨量、ET、VPD、PAR、Ta、SWC等数据由通量站相应传感器观测,并使用数据采集器记录。

(6)通过无人机搭载MicaSense多光谱传感器,获取遥感影像并计算灌区农田的归一化植被指数(NDVI)。每5 d采集一次,覆盖作物整个生育期。

1.3 研究方法

1.3.1 基于氢氧稳定同位素法的蒸散分离 根据同位素质量守恒原理,实际蒸散发的同位素质量等于玉米蒸腾同位素质量与土壤蒸发同位素质量之

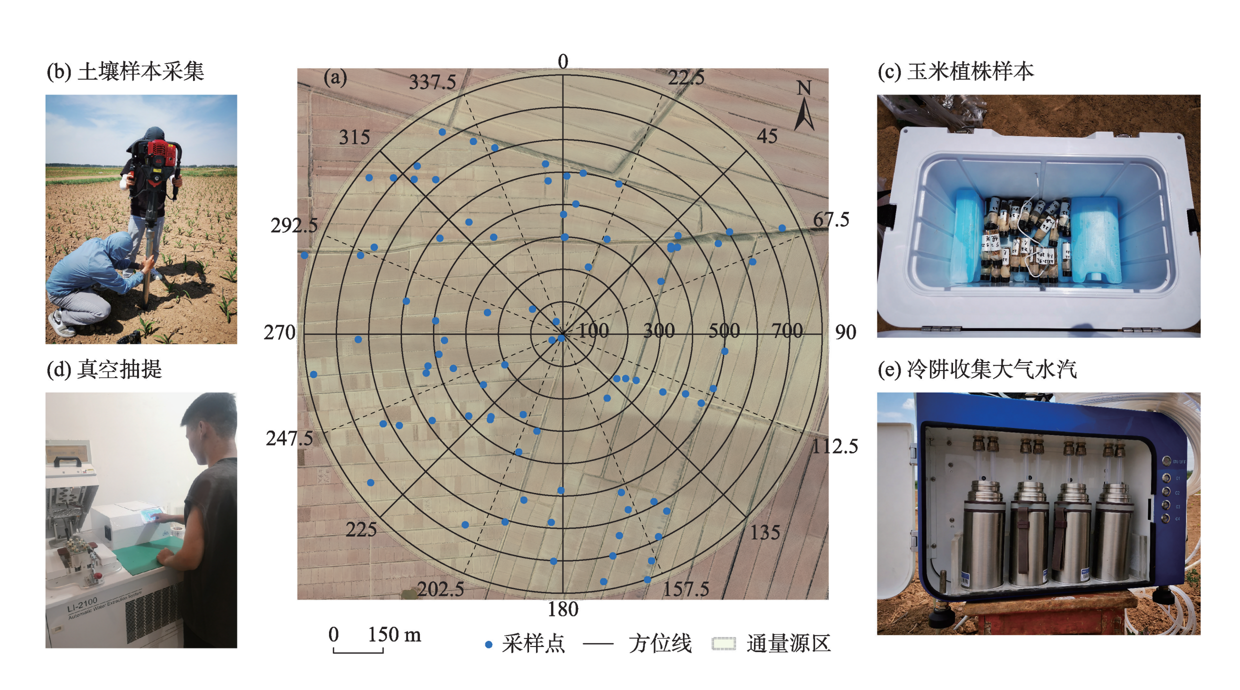


图2 通量源区采样点分布及样本采集方法

Fig. 2 Distribution of sampling points in the flux source area and sample collection methods

和。因此，本文采用同位素二源混合模型对玉米农田实际蒸散发进行分割[14]。具体方程如下：

$$\frac{T}{ET}=\frac{\delta ET-\delta E}{\delta T-\delta E} \quad (1)$$

式中：δT、δE 和 δET 分别为玉米作物蒸腾、土壤蒸发和农田实际蒸散发的液态水同位素组成，本文特指氢氧稳定同位素的 $\delta^{18}O$。通过三种液态水的稳定同位素值来计算玉米作物蒸腾，农田土壤蒸发在实际蒸散量中的各自占比，从而实现蒸散分离。

1.3.2 *总初级生产力的估算方法* 总初级生产力GPP，定义为单位空间和时间内生态系统整体光合对碳的固定[15]。最常用的GPP估算模型是光能利用率模型（Light Use Efficiency，LUE）模型，定义如下：

$$GPP=\varepsilon_{max}\times f(Ta_{min})\times f(VPD)\times APAR \quad (2)$$

式中：ε_{max} 为最大光能利用率（$g\ C\cdot MJ^{-1}$），本文取值1.87；APAR为吸收性光合有效辐射[16]；$f(Ta_{min})$ 和 $f(VPD)$ 分别表示最低气温和蒸气压差下的订正因子，表示该模型还受到气温和蒸气压差的影响。

$f(Ta_{min})$ 和 $f(VPD)$ 分别表示为：

$$f(Ta_{min})=\begin{cases}0, & (T_{MIN}<T_{MINmin})\\ \dfrac{T_{MIN}-T_{MINmin}}{T_{MINmax}-T_{MINmin}}, & (T_{MINmin}\leqslant T_{MIN}<T_{MINmax})\\ 1, & (T_{MIN}\geqslant T_{MINmax})\end{cases} \quad (3)$$

$$f(VPD)=\begin{cases}1, & (VPD<VPD_{LUE=0})\\ \dfrac{VPD_{LUEmax}-VPD}{VPD_{LUEmax}-VPD_{LUE=0}}, & (VPD_{LUE=0}\leqslant VPD<VPD_{LUEmax})\\ 0, & (VPD\geqslant VPD_{LUEmax})\end{cases} \quad (4)$$

式中：T_{MIN} 为全天最低气温（℃）；T_{MINmin} 为植被光合利用率为0时的最低温度（℃），取值为−8 ℃[17]；T_{MINmax} 为植被光合利用率达到最大时的最低温度（℃），参照MOD17产品算法取值为12.02 ℃；VPD为日平均饱和水汽压差（Pa）；VPD_{LUEmax} 为植被光合利用率达到最大值时的日平均饱和水汽压差（Pa），取值为 4.3×10^3 Pa；$VPD_{LUE=0}$ 为植被光合利用率为0时的日平均饱和水汽压差（Pa），依据MOD17产品算法取值 6.5×10^2 Pa。选用MOD17产品所使用的LUE模型算法，并结合实测数据对气温、蒸气压差进行订正，公式（2）和公式（3）中具体参数取值全部根据MOD17产品算法说明中查阅得到[17]。

公式（2）中的APAR定义为：

$$APAR=PAR\times FPAR \quad (5)$$

式中：APAR为吸收性光合有效辐射（$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$）；PAR为光合有效辐射（$\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$）；FPAR为光合有效辐射吸收系数。

光合有效辐射吸收比率通过NDVI计算。先通过多光谱遥感影像计算灌区农田的NDVI，在此基础上计算SR，最后再运用非线性半理论半经验模型反演农田FPAR值。其中，NDVI和SR的最大值和最小值可通过累积频率95%和5%计算得到。$FPAR_{max}$=0.95，$FPAR_{min}$=0.001[18]。计算公式如下：

$$NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (6)$$

$$SR=\frac{1+NDVI}{1-NDVI} \quad (7)$$

$$FPAR_{SR}=\frac{(SR-SR_{min})(FPAR_{max}-FPAR_{min})}{SR_{max}-SR_{min}}+FPAR_{min} \quad (8)$$

$$FPAR_{NDVI}=\frac{(NDVI-NDVI_{min})(FPAR_{max}-FPAR_{min})}{NDVI_{max}-NDVI_{min}}+FPAR_{min} \quad (9)$$

$$FPAR=\alpha FPAR_{SR}+(1-\alpha)FPAR_{NDVI} \quad (10)$$

式中：NIR为近红外波段反射率；R为红光波段反射率；$FPAR_{SR}$ 为比值植被指数SR计算得到的FPAR；$FPAR_{NDVI}$ 为归一化植被指数NDVI计算得到的FPAR；α 为经验系数，本文取0.5。

1.3.3 *三种水分利用效率的计算方法*

（1）群体水平水分利用效率（WUE_T）

植被通过气孔调节作用将植被光合固碳的过程与蒸腾耗水相互耦合，而土壤蒸发则是一个独立的过程，不参与农田生态系统的碳水耦合过程，因此，植物水利用效率 WUE_T，定义为GPP与T的比值[19]。表示为：

$$WUE_T=\frac{GPP}{T} \quad (11)$$

式中：GPP单位为 $g\ C\cdot m^{-2}\cdot d^{-1}$；T单位为 $mm\cdot d^{-1}$。

（2）生态系统水平水分利用效率（WUE_{ET}）

WUE_{ET} 指生态系统每消耗单位质量的水所固定的碳量，是表征陆地生态系统碳水耦合关系的关键指标，定义为总初级生产力与蒸散发的比值[20]，ET单位为 $mm\cdot d^{-1}$。

$$WUE_{ET}=\frac{GPP}{ET} \quad (12)$$

（3）固有水分利用效率（$IWUE_{VPD}$）

VPD通过控制植被叶片气孔导度从而影响农

田生态系统的碳水耦合过程，影响GPP和ET之间的关系。Beer等[7]学者2009年提出了生态系统固有水分利用效率 $IWUE_{VPD}$，定义为GPP和VPD的乘积与ET的比值，VPD的单位为hPa。

$$IWUE_{VPD}=\frac{GPP\times VPD}{ET} \quad (13)$$

1.3.4 *数据分析方法*　利用线性回归法分析VPD、PAR、CO_2浓度和气温的变化趋势，结合降雨和灌溉分析不同深度的土壤湿度以及农田生态系统生长季实际蒸散发变化特征；利用同位素质量守恒二源混合模型分割实际蒸散发得到蒸腾T和蒸发E，分析各蒸发组分在生育期内的变化特征，计算三种水分利用效率并分析各自变化特征，然后采用Pearson相关分析水分利用效率与气温、VPD、PAR、CO_2浓度和土壤含水量的相关性。介于不同环境因素对生态系统水分利用效率的影响不同[21]，本文运用Sobol'法进一步分析各环境因子对水分利用效率影响的敏感性。

2　结果与分析

2.1　农田生态系统环境因子变化特征

研究区玉米农田生态系统139~259 d(按日序数计)日平均饱和水汽压差、光合有效辐射、CO_2浓度和气温整体均呈下降趋势(图3)。其中，饱和水汽压差的峰值出现在162 d附近，达到29.75 hPa，生育期内的下降速率约−0.078 hPa·d^{-1}。

光合有效辐射在生育期内呈下降趋势，速率约为−0.114 mol·m^{-2}·d^{-1}。光合有效辐射的变化存在形似"穹盖"形的阈值，波动主要在穹盖之下发生。CO_2浓度在190 d之前的绝大部分时间内波动范围小，在410~440ppm，190 d之后在390~480ppm。气温的最高值出现在第170 d附近，达到31.8 ℃，生育期内下降速率−0.076 ℃·d^{-1}。

图4显示了研究区域玉米农田生态系统的灌水时间、降雨量和不同深度的土壤含水量变化。降雨主要发生在抽穗期至灌浆期(175~240 d)，其中第199 d(抽穗期)附近的降雨量较大。从总体来看，土壤含水量受到了降雨的影响，特别是0~20 cm、20~40 cm土壤层含水量随着降雨过程发生了较大的变化(0.221~0.409 m^3·m^{-3})，主要原因是0~40 cm土壤层含水量对降雨入渗较为敏感，而更深土壤层含水量(40~100 cm)则对降雨的响应较小。

试验区地处引黄灌区，玉米农田在第179 d和215 d进行了灌溉，所观测到的土壤含水量在该阶段

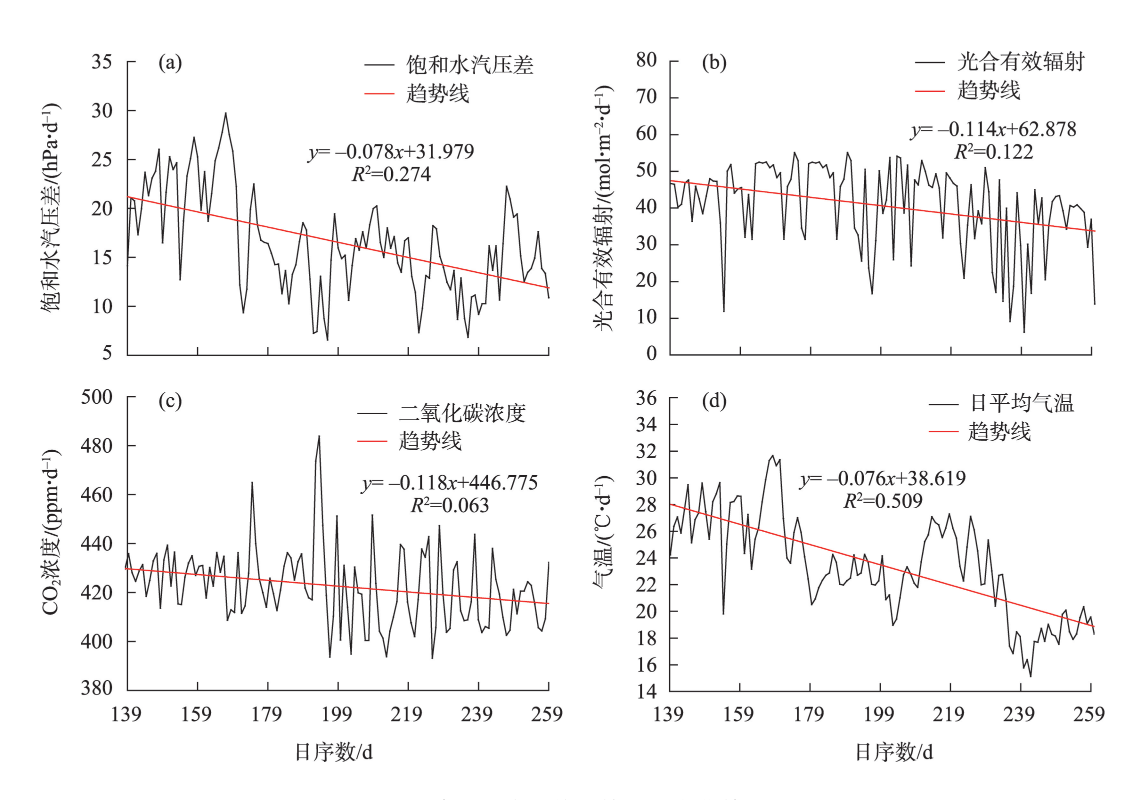


图3　农田生态系统环境因子变化特征

Fig. 3　Characteristics of changes in environmental factors in farmland ecosystems

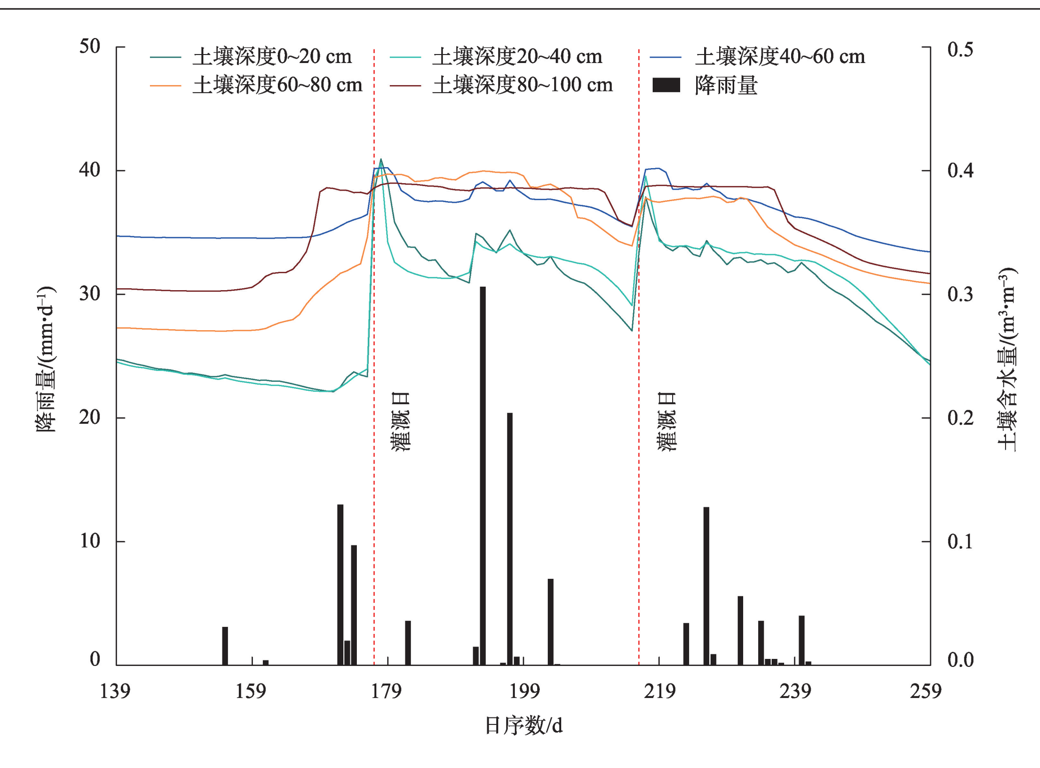


图4 农田生态系统生长季降雨量与不同深度土壤含水量的变化

Fig. 4 Variation of rainfall and SWC at different depths during the growing season of farmland ecosystems

均出现上升趋势。其中,0~20 cm、20~40 cm深度土壤含水量的上升明显,随土壤深度的增加这种上升幅度在减少。灌溉后40~60 cm、60~80 cm以及80~100 cm深度的土壤含水量之间的差异减小,但这三层明显高于浅层(0~40 cm)土壤含水量。同时也可观察到,每次灌溉后的一段时间0~20 cm土层的含水量大于20~40 cm,随着下渗、土壤蒸发以及作物消耗的综合作用,0~20 cm土层的含水量开始低于20~40 cm。

在生长季的出苗期至拔节期(139~170 d,第一次灌水之前)0~20 cm与20~40 cm深度土壤含水量最低,约0.21 $m^3 \cdot m^{-3}$。此时期40~60 cm深度的土壤含水量(0.35 $m^3 \cdot m^{-3}$)明显高于60~80 cm深度的土壤含水量(0.27 $m^3 \cdot m^{-3}$)。成熟期后段(240~259 d),40~60 cm土层深度的土壤含水量略高于60~80 cm。

2.2 玉米农田生态系统生育期实际蒸散发变化特征

通过通量站观测得到的玉米农田生态系统生长季日蒸散发可知(图5),生育期内的蒸散发呈“单驼峰型”变化。在出苗期至抽穗中后期(139~180 d)为上升段,增速在0.08 $mm \cdot d^{-1}$,181~211 d为高峰段,平均日蒸散发为4.20 $mm \cdot d^{-1}$;抽穗后期至成熟后期(212~259 d)蒸散发为下降段,速率为−0.07 $mm \cdot d^{-1}$。试验区地处干旱半干地区,降水少,生育期内降雨量只有124.1 mm,最大日降水为30 $mm \cdot d^{-1}$。降雨量与蒸散发呈此消彼长的态势,降水仅使当日蒸发量减少,次日无降雨后蒸发量快速反弹。

2.3 氢氧稳定同位素法分离的蒸散发组分及变化特征

将通量站观测的蒸散发采用氢氧稳定同位素法($\delta^{18}O$)分割得到玉米农作物蒸腾T和土壤蒸发E(图6)。蒸腾与实际总蒸散发的变化趋势相一致,均呈现先上升后下降的单驼峰形。蒸腾曲线则绝大部分时期都在土壤蒸发上方,由此看出,在农田生态系统作物蒸腾是蒸散发的主体,作物耗用的水分远多于土壤蒸发。只有在出苗期的前段农田有较大部分的裸露土壤时期,以及作物成熟末期,土壤蒸发大于微弱的作物蒸腾。

土壤蒸发在总蒸散的构成变化呈现了多峰谷变化。在蒸散发总体上升的情况下,出苗期土壤蒸发占据高值,大于作物蒸腾,随着拔节期作物冠层逐步发育,土壤蒸发从高值下降,并在气温抬升的作用下开始转为上升趋势,在178 d附近达到第一次峰值2 $mm \cdot d^{-1}$。而后随着作物冠层郁闭,作物进入孕穗、开花期,叶片蒸腾逐步加强,土壤蒸发再次下降。在199 d左右玉米进入灌浆期,此时作物主

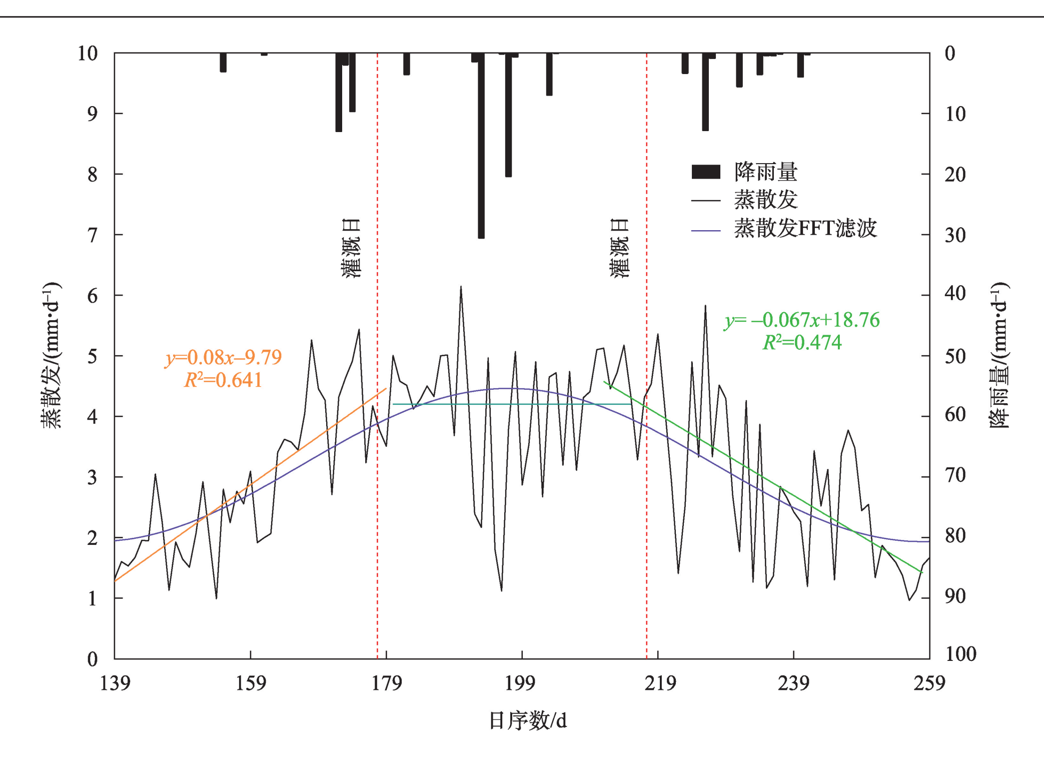


图5 农田生态系统生长季玉米实际蒸散发变化特征

Fig. 5 Changes in actual evapotranspiration of maize farmland ecosystems during the growing season

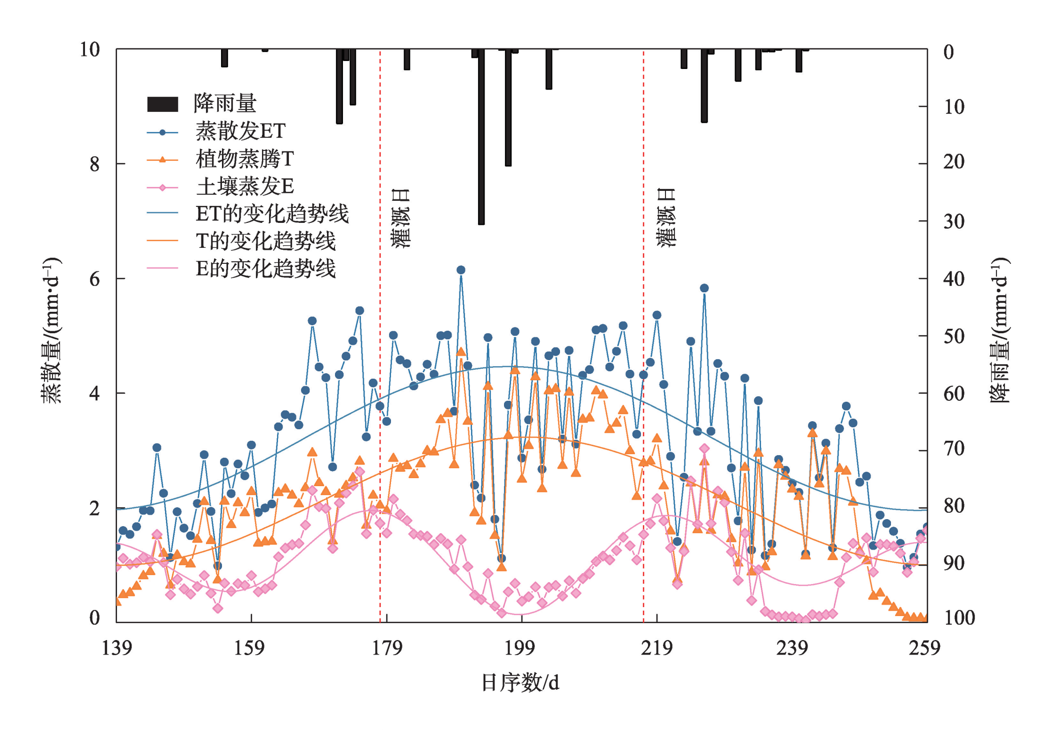


图6 基于δ^{18}O同位素守恒分离的玉米农田生态系统蒸散发变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of maize evapotranspiration based on conservation separation of δ^{18}O isotopes

要以籽粒发育为主，生殖生长最旺盛，而植物的营养生长几乎停止，作物蒸腾势弱，土壤蒸发再次上升，并在223 d左右达到第二个峰值2 mm·d^{-1}。8月11日(223 d)后时节已经入秋(8月7日立秋)，随着气温的下降土壤蒸发再次逐步走低。从240 d后的成熟期，蒸散发总量在下降，由于玉米叶片已经老化垂落，蒸腾急剧下降，土壤蒸发大于作物蒸腾。

2.4 农田生态系统生长季内水分利用效率变化特征

三种水分利用效率在生长季内的变化特征不

同(图7)。玉米苗期(139~150 d)植株矮小,生长缓慢,叶面积小,蒸腾作用小,耗水量少,WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$均处在低位。进入拔节孕穗期,茎叶生长旺盛,大量干物质开始积累,叶片蒸腾作用增强,三个水分利用效率都呈上升趋势。进入抽雄期后,玉米茎叶生长逐渐停止,株高不再增加,转为开花、授粉和结实灌浆。此期间玉米代谢过程旺盛,WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$都保持在高水平,在199 d左右达到峰值,分别为5.90 kg C·m^{-3}·H_2O,5.02 kg C·m^{-3}·H_2O,32.90 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O。

在灌浆后期至成熟前期(205~239 d),玉米干物质累积放缓,作物蒸腾趋弱,入秋气温走低,土壤蒸发同时下降,作物的三种水分利用效率均呈减小趋势。在成熟后期(240~259 d),水分利用效率WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$继续保持下降,但WUE_T出现增加趋势,主要原因是干物质量基本不变但作物蒸腾显著减少。

2.5 水分利用效率与环境因子的关系

水分利用效率与环境因素密不可分,从函数响应关系、相关性以及敏感性三个方面分析本研究区不同水分利用效率与气温、饱和水汽压差、二氧化碳浓度、有效光合辐射以及土壤含水量等环境因子之间的关系(图8)。

WUE_T、WUE_{ET}、$IWUE_{VPD}$与空气温度呈线性响

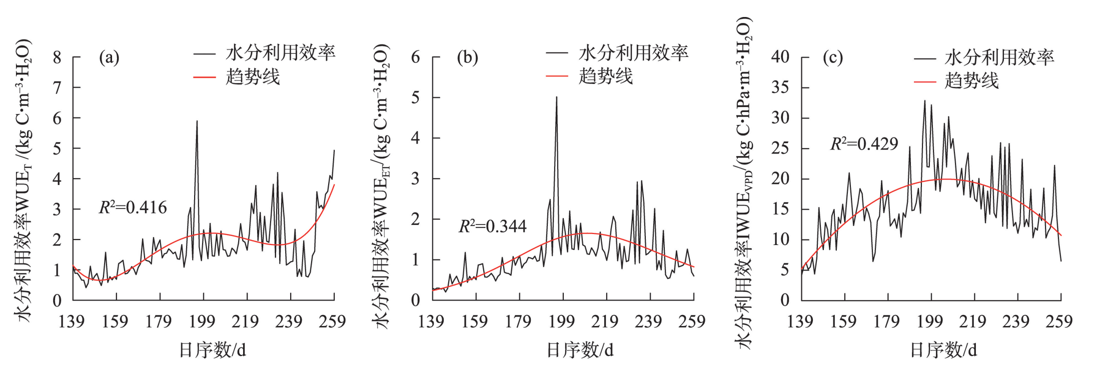


图7 农田生态系统不同定义的水分利用效率变化特征

Fig. 7 Characteristics of water use efficiency changes in different definitions of maize farmland ecosystems

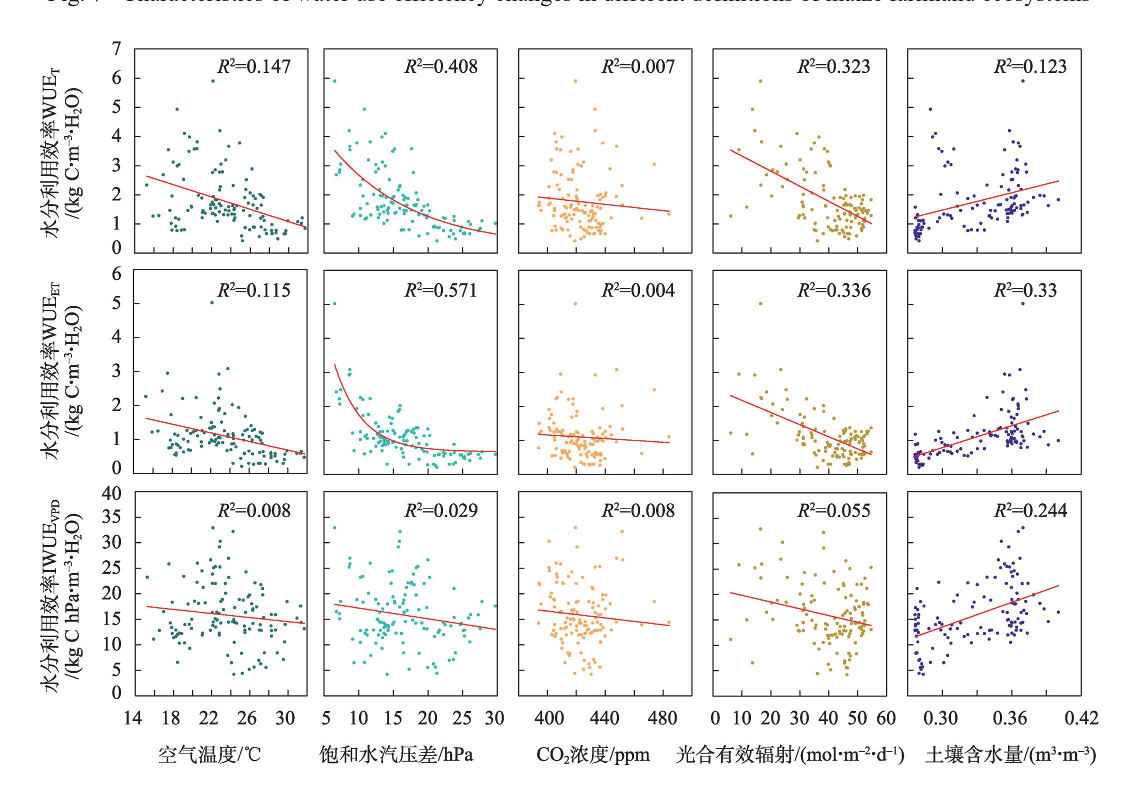
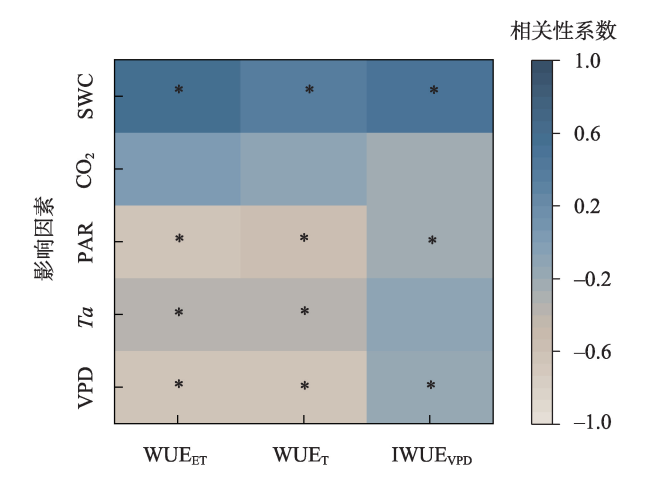


图8 玉米农田生态系统不同定义水分利用效率对环境因子的响应特征

Fig. 8 Response of water use efficiency to environmental factors in maize farmland ecosystems

应，并随气温升高而减小。WUE_T和$IWUE_{VPD}$随气温下降的速率要略快于WUE_{ET}。WUE_T、WUE_{ET}、$IWUE_{VPD}$与饱和水汽压差呈e的负次幂函数响应，水汽亏缺程度的增强会抑制水分利用效率的提高。三者与CO_2浓度呈线性递减关系，适宜的CO_2浓度可促进光合作用进行干物质积累，过高的浓度则会抑制这一过程，WUE也会降低。三种水分利用效率与光合有效辐射呈线性响应，并随辐射增强而减小。土壤含水量与三种WUE都是线性响应，WUE随土壤含水量增加而提升。

从相关性角度来看（图9），WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$与土壤含水量呈显著正相关，相关系数分别达到0.36^*、0.58^*和0.5^*。气温与WUE_T、WUE_{ET}呈显著负相关（-0.39^*、-0.35^*），与$IWUE_{VPD}$也呈负相关，系数为−0.13，但没有达到统计显著性。显然WUE_T、WUE_{ET}与温度关系更密切。饱和水汽压差与三者均呈显著负相关，系数分别为-0.63^*、-0.65^*和-0.19^*。三种水分利用效率与CO_2浓度相关性并不显著，从系数来看二者为负相关（系数分别为−0.08、−0.07、−0.25）。光合有效辐射与三者均呈现显著线性负相关，其中WUE_T、WUE_{ET}相关系数达到了-0.57^*、-0.63^*。



注：VPD表示饱和水汽压差；*Ta*表示空气温度；PAR表示光合有效辐射；CO_2表示CO_2浓度；SWC表示土壤含水量。*表示显著水平$P<0.05$。下同

图9 不同水分利用效率与环境因素的Pearson's相关分析

Fig. 9 Pearson's correlation analysis of water use efficiency and environmental factors

图10显示了环境因子与三种水分利用效率的Sobol'一阶敏感性指数(S)和总阶敏感性指数(ST)。当只考虑单因素的贡献率，WUE_T敏感性最大的因素是土壤含水量，其后依次是饱和水汽压差、光合有效辐射、空气温度、二氧化碳浓度。WUE_{ET}敏感性最大的因素是土壤含水量，其次是空气温度、光合有效辐射、饱和水汽压差、CO_2浓度。$IWUE_{VPD}$敏感性最大的因素是土壤含水量，而后是饱和水汽压差、空气温度、光合有效辐射、CO_2浓度。当考虑全局因素耦合效应时，WUE_T敏感性最大的因素是土壤含水量和饱和水汽压差，对气温、CO_2浓度和光合有效辐射不敏感。WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$最敏感的因素是土壤含水量，其他因素均不敏感。综合来看，土壤含水量是各个水分利用效率敏感性最高的因素，其次是饱和水汽压差，而气温、CO_2浓度和光合有效辐射为最不敏感因素。

3 讨论

3.1 农田生态系统水分利用效率变化特征

水分利用效率是研究农田生态系统碳水耦合的重要因素。本文三种不同定义下的农田生态系统水分利用效率变化范围和趋势不同，水分利用效率WUE_{ET}变化范围为0.21~5.02 kg C·m^{-3}·H_2O，植物水分利用效率WUE_T变化范围为0.42~5.90 kg C·m^{-3}·H_2O，固有水分利用效率$IWUE_{VPD}$变化范围为4.21~32.90 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O。年平均水分利用效率

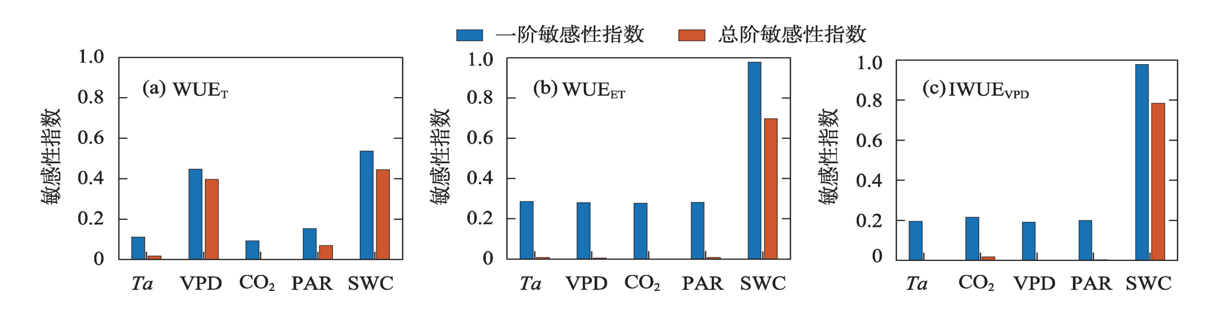


图10 不同水分利用效率与环境因子的敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of water use efficiency to environmental factors

WUE_{ET}(1.11 kg C·m^{-3}·H_2O)小于年平均植物水分利用效率WUE_T(1.77 kg C·m^{-3}·H_2O),而年平均水分利用效率WUE_{ET}和WUE_T均远小于年平均固有水分利用效率$IWUE_{VPD}$(15.82 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O)。

水分利用效率WUE_{ET}低于WUE_T,这是因为植物水分利用效率WUE_T认为土壤蒸发是一个独立的过程,不参与生态系统的碳水循环,使得计算出的植物水分利用效率偏大。在考虑外界环境因素影响下,Beer等[7]研究发现VPD影响GPP和ET之间的线性关系,VPD对叶片气孔导度作用,通过影响叶片的光合速率继而作用于生态系统碳水耦合过程,使得计算出的水分利用效率WUE_{ET}要远小于固有水分利用效率$IWUE_{VPD}$。

此外,玉米在出苗期,叶片蒸腾的速率逐渐走高,且快于光合作用的上升速度,因此,植物水分利用效率WUE_T呈下降趋势,并处于较低水平,从1.12 kg C·m^{-3}·H_2O下降至0.42 kg C·m^{-3}·H_2O。而此期间由于灌区无雨也无灌溉,土壤含水量较低,故土壤蒸发速率减小,导致实际蒸散发的速率要低于蒸腾速率,且低于光合作用的上升速度,因此,水分利用效率WUE_{ET}呈增加趋势。饱和水汽压差在整个生长季呈不断下降的趋势,但在出苗期却呈增加趋势,因此,固有水分利用效率$IWUE_{VPD}$在出苗期呈增加趋势。

随着玉米不断生长,光合作用的增加速率逐渐高于蒸腾速率,故在拔节期至抽穗后期,三种WUE均呈不断增加的趋势。在抽穗后期至成熟中期,玉米叶片老化导致光合作用速率降低,三者均呈不断减小趋势。水分利用效率WUE_{ET}和固有水分利用效率$IWUE_{VPD}$在成熟后期继续呈下降趋势,这与阚飞等[22]的研究结果相符,植物水分利用效率WUE_T与之相反。这是由于随着玉米成熟,叶片凋落,导致蒸腾的降低速率远低于光合作用的降低速率,使得植物水分利用效率WUE_T呈增加趋势。战领等[23]认为水分利用效率在生长季内不同生育期的变化趋势不同,在玉米苗期较低,随着玉米的生长不断升高,到了生长旺盛季达到最大,之后随玉米的成熟而下降。总体而言,宁夏引黄灌区玉米农田生态系统水分利用效率研究结果与前人结论相似,但明显具有本地区的特点。

3.2 水分利用效率与环境因子关系

外界的生态环境因素、植被种类、植被自身机理等都是影响生态系统水分利用效率的主要因素,且不同的环境因素对植被水分利用效率的影响不同。张桂玲等[21]研究发现,气温、空气相对湿度、土壤含水量与水分利用效率的相关性不同;黄健强等[24]认为气温、PAR、VPD对水分利用效率影响比较显著。

气孔作为植被与外界物质交换的通道,是调节植物蒸腾和光合作用的关键。植被通过调节气孔、控制CO_2吸收和水蒸腾作用来适应气温,从而影响植被水分利用效率[25]。本研究区空气温度与WUE_T、WUE_{ET}均呈显著线性负相关关系,这与Yu等[26]的研究结果一致。因为本研究区温度升高,叶片气孔增大,在一定范围内使得气孔导度增大,导致玉米农作物蒸腾速率高于GPP的增加速率,进而导致水分利用效率降低。本研究中气温与$IWUE_{VPD}$无显著相关性,但Niu等[19]的研究结果表明WUE与气温呈现正相关关系,可能因为本研究区位于干旱区,VPD较高,与温度对叶片气孔导度带来的作用相互抵消,从而导致$IWUE_{VPD}$与温度无显著相关性。此外,由敏感性分析得出,温度与三种水分利用效率的敏感性均较低。

本研究区光合有效辐射与三种水分利用效率均呈显著线性负相关关系,潜在的原因有两方面:一是这一现象与光合有效辐射过强时,作物为避免失水过多和灼伤,气孔导度降低,光合碳同化速率下降的机理一致。二是随着玉米农作物生长,冠层郁闭使得叶片相互遮挡,冠层顶部叶片的光合作用较强,而冠表下部的叶片光合作用较弱。敏感性分析的结果则表明三种水分利用效率对光合有效辐射敏感性较弱,归因于已有大量研究表明高等植物有着丰富的光保护机制,对抗了可能发生的持续性破坏[27-28]。

CO_2浓度的高低对玉米叶片气孔闭合具有关联性,通过调控玉米蒸腾与光合的生理过程,从而影响玉米的水分利用效率。由于本研究区的CO_2浓度常年处于正常水平,水分利用效率与CO_2浓度无显著相关性,且通过敏感性分析看出,CO_2浓度与水分利用效率的敏感性较低。说明CO_2浓度对灌区玉米农田生态系统水分利用效率的影响较弱。

VPD是影响玉米蒸腾的主要因素。VPD与三种水分利用效率均呈指数负相关,这与前人研究结果相一致[26]。本研究区域年降水不足200 mm,VPD

进一步增大时，土壤蒸发过程受到促进，但作物会降低气孔开度，抑制光合同化，由此使得水分利用效率减小。本文VPD是三种WUE的第二高敏感环境因子，结合二者的函数响应关系，说明上升的VPD对作物具有重要负面影响。在作物生理学的角度，VPD升高会造成作物减产。叶片气孔在高VPD下会减小开度甚至关闭，以减少蒸腾失水。但同时也不可避免地降低了光合作用，减少了碳同化，最终导致植株生长减缓。

土壤含水量是影响生态系统蒸散发的直接因素，进而影响着植被水分利用效率。郭京衡等[29]研究表明土壤含水量还可通过影响植物生理特性进而调控植物的光合作用，从而对水分利用效率产生影响。本文土壤含水量与三种水分利用效率均呈显著线性正相关关系，与张传伟等[30]的研究结论一致。且在本文中土壤水分是诸多环境因子中与WUE相关性最高的。也印证了本文研究区域属于干旱半干旱地区的灌区，无灌溉就无农业，充足的土壤水分是作物生产力的关键。在本文中土壤含水量是WUE最敏感的环境因子。作物根系从土壤中进行充足的水分供给，是作物高效开展光合作用和干物质累积的必要条件。土壤含水量显著影响水分利用效率，在适当增加土壤水分，对提高水分利用效率有较高贡献。同时，也有研究表明土壤水分充足条件下，水分利用效率随着土壤含水量的变化不再明显。且导致土壤水分的无效蒸发增加，使得WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$减小[25]。在本文中也可以看到WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$与土壤含水量敏感性最高，WUE_T与土壤含水量敏感性次之。

研究农田生态系统尺度上水分利用效率的影响因素，环境因素是必不可少。本文从函数响应关系、相关性以及敏感性三个方面，研究了不同水分利用效率与五种环境因子之间的关系，如气温、VPD、CO_2浓度、PAR以及土壤含水量等，更多潜在因素还有待于在未来长期数据上的观测进行深入研究。

3.3　T∶ET与水分利用效率的响应关系

蒸腾与蒸散比(T∶ET)是植被蒸腾量与生态系统蒸散量(ET)的贡献比，是表征生态系统水分利用效率变化的重要参数，有助于理解植被水分运动机制和生态系统碳水化合物循环过程[31]。本研究区域的平均T∶ET为0.61±0.01，与前人研究结果相接近[32]，T∶ET与WUE_{ET}、$IWUE_{VPD}$有显著的正相关关系，与WUE_T有显著的负相关关系(图9)，均通过显著性检验。

由图11可以看出，当T∶ET增加，WUE_T呈下降趋势，WUE_{ET}、$IWUE_{VPD}$呈上升趋势。可能因为蒸腾增速高于光合碳同化率的增速，导致WUE_T减小；而总蒸散发的增速低于光合碳同化速率的增加，导致WUE_{ET}、$IWUE_{VPD}$不断增大。整体来看，当T∶ET位于0.4~1之间，WUE_T保持相对稳定，T∶ET明显的增加，导致生态系统WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$增加(图11)，这表明当蒸腾占比在0.4~1之间时，T∶ET是生态系统水分利用效率的驱动因素[33]。由此，农田尺度水分利用效率的变化趋势又可通过作物蒸腾占比来反应。于文颖等[34]研究表明不同类型生态系统T∶ET变化的内在机制不明晰，且驱动机制不清，植被、气候、土壤均影响着生态系统T∶ET，不同类型生态系统T∶ET的驱动因子不同，地理位置的差异也可能

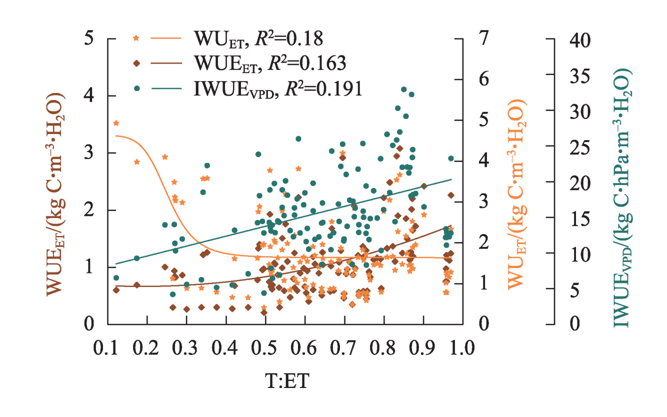


图11　T∶ET与水分利用效率的响应特征

Fig. 11　Response characteristics of T∶ET and water use efficiency

引起结果的不一致。因而，农田生态系统的T∶ET与WUE之间的关系也有待于进一步研究。

4　结 论

在涡度通量观测农田生态系统实际蒸散发的基础上、利用氢氧稳定同位素法对蒸散发进行分割，并使用光能利用模型估算了宁夏引黄灌区典型玉米农田生态系统的GPP，进而研究了三种水分利用效率的变化，影响因素及其敏感性。得出如下结论：

(1) 宁夏引黄灌区玉米农田生态系统的作物蒸腾是灌区蒸散发的主要部分，其他与实际蒸散发的

变化趋势一致，但在作物出苗和成熟的晚期，土壤蒸发强于作物蒸腾。

（2）玉米苗期WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$不高，在拔节孕穗期作物生长旺盛，各水分利用效率都快速上升，并在之后抽雄期达到峰值，分别为5.90 kg C·m^{-3}·H_2O、5.02 kg C·m^{-3}·H_2O和32.90 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O。在玉米灌浆后期至成熟前期，各水分利用效率开始走低。到玉米成熟晚期，三种水分利用效率变化趋于不同，其中WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$继续下降，但WUE_T呈增加趋势。

（3）气温、VPD、光合有效辐射、CO_2浓度与各水分利用效率为负响应，土壤含水量则与各水分利用效率为正响应。在五个环境因子中，WUE_T、WUE_{ET}和$IWUE_{VPD}$对土壤含水量的相关度和敏感性最强，VPD次之，凸显了在干旱半干旱地区的宁夏引黄灌区，土壤水分和适宜的VPD是影响玉米农田生态系统WUE的最主要因子。气温和光合有效辐射与WUE存在负相关，但不是敏感因素，CO_2浓度与三种WUE的相关性和敏感性都低。

综上，宁夏引黄灌区农田生态系统作物耗水（蒸腾）旺盛，由于灌区地处我国干旱半干旱气候带，农业生产中适宜的生态环境VPD和土壤含水量成为提升作物水分利用效率的关键。在农业用水量不断减少的背景下，利用作物不同生育期水分利用能效特点进行合理灌溉，进而提高水分利用效率是保障农业用水安全及粮食安全的根本途径，对未来研究该区域的农业生态系统碳水循环过程、水资源合理配置有参考意义。

参考文献（References）：

[1] Shen Y, Zhang Y, Scanlon B R, et al. Energy/water budgets and productivity of the typical croplands irrigated with groundwater and surface water in the North China Plain[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 181(15): 133−142.

[2] 王斌瑞, 王百田, 张府娥. 黄土高原径流林业技术研究[J]. 林业科技通讯, 1996, 39(9): 13−15, 21. [Wang Binrui, Wang Baitian, Zhang Fu' e. Research on runoff forestry technology on the Loess Plateau[J]. Forest Science and Technology, 1996, 39(9): 13−15, 21.]

[3] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. 水科学进展, 2000, 11(1): 99−104. [Wang Huixiao, Liu Changming. Advances in crop water use efficiency research[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1): 99−104.]

[4] Sun Y, Piao S, Huang M, et al. Global patterns and climate drivers of water use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(3): 311−323.

[5] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛. 树木水分利用效率研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 417−421. [Xiong Wei, Wang Yanhui, Yu Pengtao. A review on the study of water use efficiency of tree species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4): 417−421.]

[6] Yu G, Song X, Wang Q, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4): 927−937.

[7] Beer C, Ciais P, Reichstein M, et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): GB2018.

[8] 林楠, 姜然哲, 刘强, 等. 近20年三江平原地表蒸散发时空特征及驱动因素分析[J]. 中国地质, 2021, 48(5): 1392−1407. [Lin Nan, Jiang Ranzhe, Liu Qiang, et al. Spatiotemporal characteristics and driving factors of surface evapotranspiration in Sanjiang Plain in recent 20 years[J]. Geology in China, 2021, 48(5): 1392−1407.]

[9] Zhao P, Li S, Li F, et al. Comparison of dual crop coefficient method and Shuttle worth-Wallace model in evapotranspiration partitioning in a vineyard of northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2015, 160(1): 41−56.

[10] 吴友杰, 杜太生. 基于氧同位素的玉米农田蒸散发估算和区分[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 127−134. [Wu Youjie, Du Taisheng. Estimating and partitioning evapotranspiration of maize farmland based on stable oxygen isotope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 127−134.]

[11] Nie C, Huang Y, Zhang S, et al. Effects of soil water content on forest ecosystem water use efficiency through changes in transpiration/evapotranspiration ratio[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308(15): 108605.

[12] Kwon H, Law B E, Thomas C K, et al. The influence of hydrological variability on inherent water use efficiency in forests of contrasting composition, age, and precipitation regimes in the Pacific Northwest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249(15): 488−500.

[13] Xie J, Zha T, Zhou C, et al. Seasonal variation in ecosystem water use efficiency in an urban-forest reserve affected by periodic drought[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 221(1): 142−151.

[14] 林光辉. 稳定同位素生态学: 先进技术推动的生态学新分支[J]. 植物生态学报, 2010, 34(2): 119−122. [Lin Guanghui. Stable isotope ecology: A new branch of ecology resulted from technology advances[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(2): 119−122.]

[15] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems[J]. Journal of Applied Ecology, 1972, 9(3): 747−766.

[16] 康婷婷, 高苹, 居为民, 等. 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 410−420. [Kang

Tingting, Gao Ping, Ju Weimin, et al. The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of croplands in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 410-420.]

[17] 董恒, 郭宏, 袁艳斌. 基于日光诱导叶绿素荧光的陆地生态系统GPP估算研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 205-211. [Dong Heng, Guo Hong, Yuan Yanbin. Estimation of terrestrial ecosystem GPP based on sun-induced chlorophyll fluorescence[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 205-211.]

[18] 焦雪敏, 张赫林, 徐富宝, 等. 青藏高原1982—2015年FPAR时空变化分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(4): 950-961. [Jiao Xuemin, Zhang Helin, Xu Fubao, et al. Analysis of the spatio-temporal variation in fpar of the Tibetan Plateau from 1982 to 2015[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(4): 950-961.]

[19] Niu S, Xing X, Zhang Z H E, et al. Water-use efficiency in response to climate change: From leaf to ecosystem in a temperate steppe[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1073-1082.

[20] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113(1-4): 97-120.

[21] 张桂玲, 李艳琴, 罗绪强, 等. 季节性干旱下喀斯特次生林不同树种水分利用效率变化[J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 25-31. [Zhang Guiling, Li Yanqin, Luo Xuqiang, et al. Changes of water use efficiency of different tree species in karst secondary forest under seasonal drought[J]. Earth and Environment, 2021, 49(1): 25-31.]

[22] 阚飞, 岳宁, 丁林凯, 等. 不同气象条件下陇中玉米农田生态系统水分利用效率研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 116-122. [Kan Fei, Yue Ning, Ding Linkai, et al. Water use efficiency of maize agroecosystem in Longzhong Region under different weathers[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 116-122.]

[23] 战领, 杨汉波, 雷慧闽. 基于通量观测数据的玉米水碳交换量及水分利用效率分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 88-93. [Zhan Ling, Yang Hanbo, Lei Huimin. Analysis of corn water consumption, carbon assimilation and ecosystem water use efficiency based on flux observations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 88-93.]

[24] 黄健强, 邓永红, 曾小平, 等. 南亚热带针阔叶混交林生态系统水分利用效率[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2538-2545. [Huang Jianqiang, Deng Yonghong, Zeng Xiaoping, et al. Water-use efficiency in a mixed conifer-broadleaf forest ecosystem in lower subtropical China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(8): 2538-2545.]

[25] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学[J]. 核农学报, 2010, 24(3): 579. [Yu Guirui, Wang Qiufeng. Physiological ecology of photosynthesis, transpiration and water use in plants[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(3): 579.]

[26] Yu G, Song X, Wang Q, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. New Phytologist, 2008, 177(4): 927-937.

[27] 贾虎森, 李德全, 韩亚琴. 高等植物光合作用的光抑制研究进展[J]. 植物学通报, 2000, 18(3): 218-224. [Jia Husen, Li Dequan, Han Yaqin. Advances in studies on photoinhibition in photosynthesis of higher plants[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 18(3): 218-224.]

[28] 郭连旺, 沈允钢. 高等植物光合机构避免强光破坏的保护机制[J]. 植物生理学通讯, 1996, 46(1): 1-8. [Guo Lianwang, Shen Yungang. Protective mechanisms against photodamage in photosynthetic apparatus of higher plants[J]. Plant Physiology Journal, 1996, 46(1): 1-8.]

[29] 郭京衡, 李尝君, 曾凡江, 等. 2种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 166-171. [Guo Jingheng, Li Changjun, Zeng Fanjiang, et al. Relationship between root biomass distribution and soil moisture, nutrient for two desert plant species[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(1): 166-171.]

[30] 张传伟, 齐永青, 戴茂华, 等. 华北平原灌溉麦田水分利用效率的SEM多因素影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(6): 876-886. [Zhang Chuanwei, Qi Yongqing, Dai Maohua, et al. Effects of multi-factor on water use efficiency as identified by the SEM method in irrigated wheat farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 876-886.]

[31] 任小丽, 路倩倩, 何洪林, 等. 中国东部南北样带森林生态系统蒸腾与蒸散比值(T/ET)时空变化[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 63-75. [Ren Xiaoli, Lu Qianqian, He Honglin, et al. Spatio-temporal variations of the ratio of transpiration to evapotranspiration in forest ecosystems along the North-South Transect of Eastern China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(1): 63-75.]

[32] Fatichi S, Pappas C. Constrained variability of modeled T∶ET ratio across biomes[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(13): 6795-6803.

[33] Cao R, Hu Z, Jiang Z, et al. Shifts in ecosystem water use efficiency on China's loess plateau caused by the interaction of climatic and biotic factors over 1985-2015[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 291(15): 108100.

[34] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2902-2909. [Yu Wenying, Ji Ruipeng, Feng Rui, et al. Response of water stress on photosynthetic characteristics and water use efficiency of maize leaves in different growth stage[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2902-2909.]

Changes, influencing factors and sensitivity of water use efficiency in maize farmland ecosystems based on evapotranspiration separation in the Ningxia irrigated area

ZHUANG Haoran[1], FENG Kepeng[1,2,3], XU Dehao[1]

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Areas, Ministry of Education, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 3. Ningxia Engineering Research Center for Water-saving Irrigation and Water Resources Control, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important indicator of the carbon-water cycle of farmland ecosystems and is of great significance for guiding agricultural irrigation and improving water productivity. Ningxia Irrigation area is a large-scale irrigation district located in the arid climate zone of China, where the corn planting area is the largest. Based on eddy flux observation of actual evapotranspiration (ET) of farmland ecosystems, this paper used the hydrogen and oxygen stable isotope method to segment evapotranspiration and estimated the total primary productivity (GPP) of typical maize farmland ecosystems in the Yellow River irrigation area of Ningxia using the LUE (Light Use Efficiency) model. Population Water Use Efficiency WUE_T = GPP/T, Ecosystem Water Use Efficiency WUE_{ET} = GPP/T, and Intrinsic Water Use Efficiency $IWUE_{VPD}$ = (GPP·VPD)/ET were calculated. Then, the relationship between different WUE and environmental factors, such as air temperature, saturated water vapor pressure difference, CO_2 concentration, effective photosynthetic radiation, and soil water content was analyzed from three aspects: functional response relationship, correlation, and sensitivity. The result showed that the variation of actual evapotranspiration in the growing season of the maize agro-ecosystem in the Ningxia yellow irrigation area was single-humped, and the trends of crop transpiration and actual evapotranspiration were consistent. The variation of water use efficiency in the growing season was different among the three species, with WUE_T showing a "W-shaped" variation pattern during the growing season while WUE_{ET} and $IWUE_{VPD}$ showed a "single-hump" variation pattern. All three WUE peaks occurred at the male tasseling stage, reaching (5.90 kg C·m^{-3}·H_2O, 5.02 kg C·m^{-3}·H_2O, 32.9 kg C·hPa·m^{-3}·H_2O) respectively. The three kinds of water use efficiency began to decrease in the late filing period, and WUE_T increased slightly in the late ripening period due to weak transpiration. Among the five environmental factors, WUE_T, WUE_{ET} and $IWUE_{VPD}$ were positively correlated with soil water content, and the correlation and sensitivity were the strongest. The three water use efficiencies were significantly negatively correlated with VPD, with the second strongest correlation and sensitivity. Air temperature, photosynthetically active radiation, and CO_2 concentration were negatively correlated with the three kinds of WUE but not critical factors. Therefore, soil moisture and VPD are the key factors affecting the WUE of the maize farmland ecosystem in the Yellow River irrigation area of Ningxia.

Keywords: stable isotopes of hydrogen and oxygen; evapotranspiration separation; light use efficiency model; gross primary productivity; crop transpiration